

**PENGHASILAN PAPAN GENTIAN PELAMBAT
KEBAKARAN DARIPADA GENTIAN KAYU
GETAH DAN GENTIAN KOTAK KERTAS
TERULANG DENGAN ALUMINIUM
TRIHIDROKSIDA**

oleh

LIM SZE HOW

**Tesis diserahkan untuk memenuhi
sebahagian keperluan bagi
Ijazah Sarjana Sains**

Mei 2001

KANDUNGAN

Muka Surat

PENGHARGAAN	v
SENARAI RAJAH	vi
SENARAI JADUAL	x
ABSTRAK	xii
1. PENGENALAN	1
1.1 Umum	1
1.2 Objektif	3
2. TINJAUAN BACAAN	4
2.1 Papan Gentian	4
2.1.1 Pengenalan	4
2.1.2 Jenis Papan Gentian	5
2.1.3 Pemprosesan Papan Gentian	6
2.1.4 Ikatan dalam Papan Gentian	10
2.1.4.1 Ikatan Hidrogen	10
2.1.4.2 Ikatan Lignin	11
2.1.4.3 Ikatan Perekat	11
2.1.5 Perbandingan antara Proses Kering dengan Proses Basah	11
2.1.5.1 Proses Basah	12
2.1.5.2 Proses Kering	12
2.2 Pelambat Kebakaran	14
2.2.1 Kebakaran	14
2.2.2 Kimia Api	15
2.2.3 Pirolisis kayu	17
2.2.4 Pembakaran Kayu	19
2.2.5 Degradasi Terma bagi Komponen Kayu	21
2.2.5.1 Degradasi Terma Selulosa	21
2.2.5.2 Degradasi Terma Hemiselulosa	22
2.2.5.3 Degradasi Terma Lignin	23
2.2.6 Teori Mekanisme Pelambat Kebakaran	23
2.2.6.1 Teori Terma	24
2.2.6.2 Teori Penyalutan	24
2.2.6.3 Teori Gas	24
2.2.6.4 Teori Bahan Kimia	25
2.2.7 Kaedah Rawatan Pelambat Kebakaran	25
2.2.7.1 Kaedah Pencampuran	25
2.2.7.2 Kaedah Impreg	26
2.2.7.3 Kaedah Penyalutan	26
2.2.8 Bahan Kimia Pelambat Kebakaran	27
2.2.8.1 Kandungan Halogen	27
2.2.8.2 Kandungan Fosforus	28
2.2.8.3 Kandungan Nitrogen	28
2.2.8.4 Kandungan Tak Organik	28
2.2.9 Produk Kayu Pelambat Kebakaran	29

2.3	Kayu Getah	31
2.3.1	Pokok Getah	31
2.3.2	Penanaman Pokok Getah yang Asli	32
2.3.3	Anatomi Kayu Getah	32
2.3.4	Kulit Kayu Getah	32
2.3.5	Sifat Fizikal dan Mekanikal Kayu Getah	33
2.3.6	Penggunaan dan Kebaikan Kayu Getah	35
2.4	Kotak Kertas Beralun	37
2.4.1	Pengenalan	37
2.4.2	Bahan Mentah	37
2.4.3	Pemulpaan dan Penghasilan Kertas	38
2.4.4	Penghasilan Kotak Kertas	39
2.4.5	Kitaran Semula Kotak Kertas dan Alam Sekitar	40
2.4.6	Sifat Kertas Kitaran Semula	40
2.5	Aluminium Trihidroksida (ATH)	42
2.5.1	Pengenalan	42
2.5.2	Sifat-sifat Aluminium Trihidroksida (ATH)	43
2.5.3	Kegunaan Aluminium Trihidroksida	44
2.5.4	ATH sebagai Bahan Pelambat Kebakaran	44
2.5.5	Mekanisme	46
2.6	Perekat Fenol Formaldehid (PF)	47
2.6.1	Perkembangan	47
2.6.2	Penghasilan Fenol Formaldehid	48
2.6.3	Penyediaan Perekat	48
2.6.3.1	Perekat Resol	48
2.6.3.2	Perekat Novalak	51
2.6.4	Sifat-sifat Perekat Fenol Formaldehid	53
3.	EKSPERIMEN	55
3.1	Pemendakan Aluminium Trihidroksida (ATH)	55
3.1.1	Analisis Keluk Penitratan Pemendakan ATH	55
3.1.2	Analisis Jisim Mendakan ATH pada pH yang Berlainan	56
3.2	Penghasilan Papan Gentian	56
3.2.1	Penyepaian Kotak Kertas Beralun (OCC)	56
3.2.2	Penentuan Kebebasan (Freeness) Pulpa Gentian	57
3.2.3	Penentuan Kandungan Pepejal Perekat Fenol Formaldehid (PF)	58
3.2.4	Proses Pembuatan Papan Gentian	59
3.2.5	Penyediaan Sampel Ujian	62
4.	UJIAN	64
4.1	Ujian Indeks Oksigen	64
4.2	Ujian Termogravimetri (TG)	64
4.3	Ujian Kalorimetri Pengimbasan Pembezaan (DSC)	65
4.4	Ujian Mikroskopik Pengimbasan Elektron (SEM) - EDAX	66
4.5	Ujian Kekuatan Ikatan Dalam	67
4.6	Ujian Penyerapan Air	67
4.7	Ujian Pengembangan Ketebalan	68

5. KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	69
5.1 Proses Penghasilan Papan Gentian	69
5.1.1 Pemendakan ATH dengan Gentian	69
5.1.2 Pengemparan dan Pencairan Mendakan ATH	71
5.1.3 Pembentukan pada Konsistensi Sederhana, 16%	72
5.1.4 Pembentukan pada Konsistensi Rendah, 8%	73
5.1.5 Kajian Masa Pembentukan	74
5.1.6 Penambahan Gentian OCC	76
5.1.7 Tindak Balas antara ATH, Perekat PF dan Gentian	79
5.2 Formulasi Pemendakan ATH	81
5.3 Keluk Penitratan Pemendakan ATH	82
5.4 Jisim Mendakan ATH pada pH yang Berlainan	83
5.5 Sifat Gentian Kotak Kertas Beralun (OCC)	85
5.6 Sifat Kebebasan (Freeness) Pulpa Gentian	86
5.7 Sifat Papan Gentian yang dihasilkan	87
5.8 Kandungan Pepejal Perekat Fenol Formaldehid (PF)	91
5.9 Nilai Indeks Oksigen	93
5.10 Keluk Termogravimetri (TG)	105
5.11 Keluk Kalorimetri Pengimbasan Pembezaan (DSC)	110
5.12 Mikroskopik Pengimbasan Elektron (SEM) – EDAX	117
5.12.1 Permukaan Tepi Papan Gentian	117
5.12.2 Permukaan Kegagalan Papan Gentian	120
5.13 Nilai Kekuatan Ikatan Dalaman	127
5.14 Nilai Penyerapan Air	140
5.15 Nilai Pengembangan Ketebalan	145
6. KESIMPULAN	151
7. CADANGAN UNTUK KAJIAN MASA HADAPAN	152
RUJUKAN	153
LAMPIRAN	158
Lampiran A Formulasi Penghasilan Papan Gentian	158
Lampiran B Keputusan Ujian Indeks Oksigen	161

PENGHARGAAN

Di sini, saya ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada Dr. Rokiah bt. Hashim selaku penyelia utama dan penolong penyelia iaitu Profesor Madya Dr. R.N. Kumar atas sokongan, bimbingan dan tunjuk ajar dalam penyelidikan ini.

Selain itu, tidak lupa juga semua pembantu makmal dari bahagian Teknologi Kayu, Kertas dan Penglitup iaitu En. Zamhari, En. Maarof, En. Azizan dan En. Azhar, bahagian Teknologi Polimer iaitu En. Mohd. Hassan, dan juga pembantu makmal millennium iaitu Tuan Haji Ishak, atas bantuan yang disumbangkan.

Di samping itu, saya juga ingin berterima kasih kepada semua pensyarah bahagian Teknologi Kayu, Kertas dan Penglitup yang menyumbangkan didikan. Tambahan pula, tunjur ajar daripada pensyarah telah banyak membantu saya menjalani kajian dengan penuh yakin. Selain itu, saya ingin berterima kasih kepada Syarikat Merbok MDF Sdn. Bhd., Syarikat Public Packages Sdn. Bhd., dan Syarikat Borden Chemical (M) Sdn. Bhd. yang membekalkan bahan mentah untuk keperluan kajian ini. Bantuan biasiswa daripada pihak kerajaan dan universiti amat dihargai.

Akhir sekali, kepada kawan saya iaitu Low Lin Hooi, ibu bapa dan rakan-rakan seperjuangan saya yang sama-sama mengaji atas bantuan, sokongan dan galakan daripada mereka, akan saya kenangi selama-lamanya.

LIM SZE HOW

Mei 2001

SENARAI RAJAH

Muka Surat

Rajah 2.1: Pengelasan papan yang berasaskan kayu	4
Rajah 2.2: Cara penghasilan papan gentian	7
Rajah 2.3: Gambarajah ringkas pemprosesan papan gentian secara kering dan basah	9
Rajah 2.4: Pemprosesan jenis papan gentian secara basah	9
Rajah 2.5: Fasa yang berlaku dalam kebakaran	14
Rajah 2.6: Gambarajah segitiga api	15
Rajah 2.7: Pirolisis kayu dalam keadaan tanpa udara (oksigen)	17
Rajah 2.8: Keratan rentas kayu yang terbakar atau menjalani pirolisis	19
Rajah 2.9: (a) β -D-Glukopiranos (D-glukosa dalam keadaan stabil); (b) sebahagian molekul selulosa	20
Rajah 2.10: Struktur levoglukosan	21
Rajah 2.11: Struktur papan gentian beralun	39
Rajah 3.1: Carta penghasilan papan gentian daripada campuran gentian dengan kandungan ATH dan perekat	59
Rajah 3.2: Cara penghasilan papan gentian pelambat kebakaran menggunakan proses basah	60
Rajah 3.3: Rajah pemotongan sampel ujian	63
Rajah 5.1: Carta penghasilan papan gentian dengan pemendakan ATH bersama gentian	69
Rajah 5.2: Carta penghasilan papan gentian dengan pengemparan dan pencairan mendakan ATH	71
Rajah 5.3: Dua ikatan yang mungkin terbentuk daripada alum	77
Rajah 5.4: Ikatan kimia antara gentian dan ATH dengan kehadiran perekat PF	79
Rajah 5.5: Ikatan hidrogen (garis putus) antara gentian dan ATH dengan kehadiran perekat PF	79
Rajah 5.6: Ikatan kimia antara gentian dengan ATH	80
Rajah 5.7: Ikatan hidrogen (garis putus) antara gentian dengan ATH	80
Rajah 5.8: Keluk penitratan untuk pemendakan aluminium trihidroksida	82
Rajah 5.9: Jisim aluminium trihidroksida yang dimendakkan pada pH yang berlainan	83
Rajah 5.10: Perbandingan kebebasan campuran gentian daripada gentian kayu getah dan gentian OCC	86

Rajah 5.11: Perbandingan ketumpatan bagi papan gentian daripada campuran gentian kayu getah dan gentian OCC	89
Rajah 5.12: Perbandingan ketumpatan bagi papan gentian (tanpa perekat) daripada pelbagai campuran gentian dengan kandungan ATH yang tertentu	89
Rajah 5.13: Perbandingan ketumpatan bagi papan gentian (2% PF) daripada pelbagai campuran gentian dengan kandungan ATH yang tertentu	90
Rajah 5.14: Perbandingan indeks oksigen papan gentian campuran (tanpa PF) pada kandungan ATH tertentu	93
Rajah 5.15: Perbandingan indeks oksigen papan gentian campuran (2% PF) pada kandungan ATH tertentu	94
Rajah 5.16: Perbandingan indeks oksigen papan gentian campuran (tanpa perekat) pada kandungan gentian tertentu	94
Rajah 5.17: Perbandingan indeks oksigen papan gentian campuran (2% PF) pada kandungan gentian tertentu	95
Rajah 5.18: Perbandingan indeks oksigen papan gentian daripada gentian kayu getah dan gentian OCC	97
Rajah 5.19: Perbandingan indeks oksigen papan gentian kayu getah (R100) pada kandungan ATH tertentu	97
Rajah 5.20: Perbandingan indeks oksigen papan gentian campuran (R75/C25) pada kandungan ATH tertentu	98
Rajah 5.21: Perbandingan indeks oksigen papan gentian campuran (R50/C50) pada kandungan ATH tertentu	98
Rajah 5.22: Perbandingan indeks oksigen papan gentian campuran (R25/C75) pada kandungan ATH tertentu	99
Rajah 5.23: Perbandingan indeks oksigen papan gentian OCC (C100) pada kandungan ATH tertentu	99
Rajah 5.24: Perbandingan indeks oksigen dengan hasil karbon untuk papan gentian kayu getah (2% PF) pada kandungan ATH tertentu	101
Rajah 5.25: Perbandingan indeks oksigen dengan hasil karbon untuk papan gentian OCC (2% PF) pada kandungan ATH tertentu	102
Rajah 5.26: Keluk TG bagi papan gentian kayu getah pada kandungan ATH tertentu	106
Rajah 5.27: Keluk TG bagi papan gentian OCC pada kandungan ATH tertentu	107
Rajah 5.28: Keluk kalorimetri pengimbasan pembezaan bagi mendakan ATH	111
Rajah 5.29: Keluk kalorimetri pengimbasan pembezaan bagi papan gentian kayu getah kawalan, R100/0/0	112

Rajah 5.30: Keluk kalorimetri pengimbasan pembezaan bagi papan gentian kayu getah, R100/20/2 dengan perekat PF	113
Rajah 5.31: Keluk kalorimetri pengimbasan pembezaan bagi papan gentian OCC kawalan, C100/0/0	114
Rajah 5.32: Keluk kalorimetri pengimbasan pembezaan bagi papan gentian OCC, C100/20/2 dengan perekat PF	115
Rajah 5.33: Mikrograp mikroskopik pengimbasan elektron (x 200, 15 KV) pada permukaan tepi papan gentian diperbuat daripada (a) gentian kayu getah tanpa perekat, R100/0/0, (b) gentian OCC tanpa perekat, C100/0/0	117
Rajah 5.34: Mikrograp mikroskopik pengimbasan elektron (x 200, 15 KV) pada permukaan tepi papan gentian diperbuat daripada (c) gentian kayu getah menggunakan perekat, R100/20/2, (d) gentian OCC menggunakan perekat, C100/20/2	117
Rajah 5.35: Mikrograp mikroskopik pengimbasan elektron (x 200, 15 KV) pada permukaan kegagalan papan gentian diperbuat daripada (e) gentian kayu getah tanpa perekat, R100/0/0, (f) gentian OCC tanpa perekat. C100/0/0	120
Rajah 5.36: Mikrograp mikroskopik pengimbasan elektron (x 200, 15 KV) pada permukaan kegagalan papan gentian diperbuat daripada (g) gentian kayu getah menggunakan perekat. R100/20/2. (h) gentian OCC menggunakan perekat. C100/20/2	120
Rajah 5.37: Analisis EDAX bagi papan gentian kayu getah kawalan. R100/0/0	123
Rajah 5.38: Analisis EDAX bagi papan gentian kayu getah, R100/20/2 dengan 20% ATH dan 2% perekat PF	124
Rajah 5.39: Analisis EDAX bagi papan gentian OCC kawalan. C100/0/0	125
Rajah 5.40: Analisis EDAX bagi papan gentian OCC. C100/20/2 dengan 20% ATH dan 2% perekat PF	126
Rajah 5.41: Perbandingan kekuatan ikatan dalaman papan gentian campuran (tanpa perekat) pada kandungan ATH tertentu	128
Rajah 5.42: Perbandingan kekuatan ikatan dalaman papan gentian campuran (2% PF) pada kandungan ATH tertentu	128
Rajah 5.43: Perbandingan kekuatan ikatan dalaman papan gentian campuran daripada gentian kayu getah dan gentian OCC	132
Rajah 5.44: Perbandingan kekuatan ikatan dalaman papan gentian kayu getah (R100) pada kandungan ATH tertentu	133
Rajah 5.45: Perbandingan kekuatan ikatan dalaman papan gentian campuran (R75/C25) pada kandungan ATH tertentu	134
Rajah 5.46: Perbandingan kekuatan ikatan dalaman papan gentian campuran (R50/C50) pada kandungan ATH tertentu	134

Rajah 5.47: Perbandingan kekuatan ikatan dalaman papan gentian campuran (R25/C75) pada kandungan ATH tertentu	135
Rajah 5.48: Perbandingan kekuatan ikatan dalaman papan gentian OCC (C100) pada kandungan ATH tertentu	137
Rajah 5.49: Perbandingan penyerapan air papan gentian campuran (tanpa perekat) pada kandungan ATH tertentu	142
Rajah 5.50: Perbandingan penyerapan air papan gentian campuran (2% PF) pada kandungan ATH tertentu	142
Rajah 5.51: Perbandingan penyerapan air papan gentian campuran daripada gentian kayu getah dan gentian OCC	144
Rajah 5.52: Perbandingan pengembangan ketebalan papan gentian campuran (tanpa perekat) pada kandungan ATH tertentu	147
Rajah 5.53: Perbandingan pengembangan ketebalan papan gentian campuran (2% PF) pada kandungan ATH tertentu	147
Rajah 5.54: Perbandingan pengembangan ketebalan papan gentian campuran daripada gentian kayu getah dan gentian OCC	149

SENARAI JADUAL

Muka Surat

Jadual 2.1: Pengelasan jenis papan gentian	6
Jadual 2.2: Sifat fizikal dan mekanikal kayu getah	34
Jadual 2.3: Bilangan paten yang menggunakan ATH sebagai bahan pelambat kebakaran	45
Jadual 3.1: Komposisi campuran gentian kayu getah dan gentian OCC	60
Jadual 5.1: Kehilangan berat ATH pada konsistensi campuran gentian yang berlainan	70
Jadual 5.2: Kehilangan berat ATH pada masa pembentukan yang tertentu	74
Jadual 5.3: Kehilangan berat ATH untuk jenis papan gentian yang berlainan	78
Jadual 5.4: Berat ATH yang dimendakkan pada pH tertentu	84
Jadual 5.5: Ketumpatan dan ketebalan papan gentian yang dihasilkan	88
Jadual 5.6: Kandungan pepejal perekat PF	91
Jadual 5.7: Indeks oksigen untuk papan gentian campuran dengan kandungan ATH dan perekat PF tertentu	96
Jadual 5.8: Perbandingan indeks oksigen dengan hasil karbon untuk papan gentian kayu getah dan papan gentian OCC pada kandungan ATH tertentu	102
Jadual 5.9: Kehilangan berat dan peratusan hasil karbon (500 ⁰ C) papan gentian kayu getah dan OCC pada kandungan ATH tertentu	105
Jadual 5.10: Kekuatan ikatan dalaman papan gentian campuran dengan kandungan ATH dan perekat PF tertentu	127
Jadual 5.11: Pengelasan papan gentian mengikut kekuatan ikatan dalaman berdasarkan JIS A 5906 : 1983	129
Jadual 5.12: Analisis ujian statistik kekuatan ikatan dalaman bagi kesan campuran gentian terhadap papan gentian pada kandungan ATH tertentu	130
Jadual 5.13: Analisis ujian statistik kekuatan ikatan dalaman bagi kesan kandungan ATH terhadap papan gentian pada campuran gentian tertentu	131
Jadual 5.14: Analisis ujian statistik kekuatan ikatan dalaman bagi kesan penambahan perekat PF terhadap papan gentian pada campuran gentian dan kandungan ATH tertentu	131
Jadual 5.15: Penyerapan air papan gentian campuran pada kandungan ATH dan perekat PF tertentu	141
Jadual 5.16: Analisis ujian statistik penyerapan air bagi kesan campuran gentian terhadap papan gentian pada kandungan ATH tertentu	143

Jadual 5.17: Analisis ujian statistik penyerapan air bagi kesan kandungan ATH terhadap papan gentian pada campuran gentian yang tertentu	143
Jadual 5.18: Analisis ujian statistik penyerapan air bagi kesan kandungan perekat PF terhadap papan gentian pada kandungan ATH dan campuran gentian tertentu	144
Jadual 5.19: Pengembangan ketebalan papan gentian campuran pada kandungan ATH dan perekat PF tertentu	146
Jadual 5.20: Analisis ujian statistik pengembangan ketebalan bagi kesan campuran gentian terhadap papan gentian pada kandungan ATH tertentu	148
Jadual 5.21: Analisis ujian statistik pengembangan ketebalan bagi kesan kandungan ATH terhadap papan gentian pada campuran gentian tertentu	148
Jadual 5.22: Analisis ujian statistik pengembangan ketebalan bagi kesan kandungan perekat PF terhadap papan gentian pada kandungan ATH dan campuran gentian tertentu	149

ABSTRAK

Kajian ini merupakan kajian permulaan dalam perkembangan penghasilan papan gentian pelambat kebakaran. Bahan pelambat kebakaran digunakan ialah aluminium trihidroksida (ATH) yang disintesis dengan proses pemendakan secara makmal. Proses basah (S2S) digunakan dalam penghasilan papan gentian daripada campuran gentian kayu getah dan gentian kotak kertas beralun (OCC). Beberapa jenis papan gentian telah dibuat berdasarkan nisbah gentian kayu getah kepada gentian OCC iaitu 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 berasaskan peratusan berat. Perekat fenol formaldehid (PF) sebanyak 2% dicampurkan, dan peratusan ATH digunakan ialah 10%, 15% dan 20% berdasarkan berat gentian selepas kering ketuhar. Keputusan menunjukkan ATH yang digunakan, mudah diserap oleh gentian OCC berbanding dengan gentian kayu getah. Dari ujian indeks oksigen, analisis termogravimetri (TG) dan kalorimetri pengimbasan pembezaan (DSC), keputusan menunjukkan peratusan pengisian ATH semakin bertambah, sifat pelambat kebakaran papan gentian dapat ditingkatkan. Peningkatan nilai indeks oksigen yang signifikan ditunjukkan selepas pengisian ATH. Pemerhatian mikroskopik pengimbasan elektron (SEM) dijalankan pada permukaan tepi dan permukaan kegagalan papan gentian. Didapati bahawa gentian OCC membentuk papan yang lebih tumpat berbanding dengan gentian kayu getah, dan pengisian ATH juga telah memadatkan struktur papan. Sifat kekuatan ikatan dalaman (IB) dan kestabilan dimensi papan dipengaruhi oleh pengisian ATH. Penambahan ATH ini meningkatkan kekuatan IB papan dan menstabilkan dimensi papan. Kebanyakan papan gentian dengan pengisian ATH yang dihasilkan dapat memenuhi syarat kekuatan IB yang ditetapkan oleh piawaian JIS A 5906 : 1983. Akan tetapi, pengembangan ketebalan semua jenis papan melebihi nilai minimum 12%. Kesimpulannya campuran gentian OCC dengan gentian kayu getah serta pengisian ATH

berpotensi menghasilkan produk papan gentian yang bersifat pelambat kebakaran yang baik.

Development of Wet Formed Fire Retardant Fiberboard from Rubberwood Fiber and Recycled Old Corrugated Container Fiber with Aluminium Trihydroxide

ABSTRACT

This study was the preliminary stage of the development of wet formed fire retardant fiberboard. Aluminium trihydroxide (ATH) slurry was used as the fire retardant chemical and it was precipitated through laboratory method. Wet process (S2S) was used to manufacture fiberboard with admixture fibers from rubberwood and old corrugated container. Fiberboards were made at ratio of rubberwood fibers to old corrugated container fibers as 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 in weight percentage. Meanwhile, 2% liquid form of phenol formaldehyde (PF) resin, and 10%, 15% and 20% of ATH based on the oven dry weight of fibers were used. It was found that OCC fibers highly retained ATH in fiber mat compared to rubberwood fibers that have low retention of ATH. Oxygen index test, thermal gravimetric analysis and differential scanning calorimetry analysis demonstrated that at sufficient loading of ATH could significantly improved the fire retardant property of fiberboard. There was a remarkable increase of oxygen index at ATH loading in fiberboards studied. Observation using scanning electron microscope (SEM) was made at the edges and fracture surface of fiberboard. It was found that fiberboards made from OCC fibers formed denser than fiberboards made from rubberwood fibers. The use of ATH has resulted in more compact fiber network. The results showed that the internal bond strength (IB) and dimensional stability were significantly influenced by the ATH loading. Loading of ATH increased the IB strength and dimensional stability of the fiberboard. Most of ATH loaded fiberboard met the standard for IB strength specified by the JIS A 5906 : 1983. All fiberboards have showed thickness swelling value over the 12% limit. From this study, fiberboard made from admixture fibers from OCC and

rubberwood with ATH were found to have potential to warrant investigation of their application as actual panel products and fire retardant boards.

1. PENGENALAN

1.1. Umum

Sebagai proses, api boleh berlaku dalam pelbagai bentuk, tetapi semuanya melibatkan tindak balas antara bahan boleh bakar dengan oksigen daripada udara. Api yang terkawal akan membekalkan kemudahan dan kebaikan, ia bertindak sebagai punca atau sumber tenaga kepada sektor perindustrian dan juga keperluan asas rumah tangga. Akan tetapi, api yang tidak terjaga atau tidak terkawal akan membawa bencana kepada manusia dengan kebakaran yang berlaku. Menurut statistik daripada Jabatan Bomba Malaysia menunjukkan bahawa terdapat 2609 kes kebakaran bangunan pada tahun 1998 (Anonymous, 2001). Daripada data ini, kemusnahan harta benda dan kehilangan nyawa adalah banyak sekali. Perabot merupakan sebahagian yang utama dalam bangunan dan ia boleh membantu rebakan api, apabila ia didedahkan kepada punca api seperti lilin dan rokok. Dengan itu, melambatkan rebakan api atau pencegahan pengembangan api bagi perabot merupakan salah satu cara mengurangkan kemalangan kebakaran.

Sekarang ini, kebanyakan perabot yang digunakan seperti almari, meja dan kerusi adalah berasaskan bahan kayu. Sebagai contoh, papan gentian adalah bahan komposit yang biasa digunakan. Dengan tekstur yang serata, permukaan yang padat, menjadikannya sesuai dicat, dilitup dan dijalani aktiviti pemprosesan sekunder seperti pembentukan dan pengetaman (Tousmis, 1991). Permintaan papan gentian meningkat disebabkan pembekalan papan lapis telah berkurangan. Dengan itu, papan gentian telah menguasai pasaran masa kini dan perindustrian perabot yang biasa menggunakan papan partikel juga mulai menggunakan papan gentian (Anonymous, 1998). Papan gentian diperbuat daripada gentian kayu atau gentian bukan kayu, dan

ia adalah senang terbakar (Shaw, 1991). Oleh itu, papan gentian pelambat kebakaran merupakan pilihan dalam menentang kebakaran.

Pada masa ini, kayu getah adalah bahan utama yang digunakan dalam industri penghasilan papan gentian di Malaysia. Dengan pertumbuhan industri pembuatan papan gentian yang pesat, dan permintaan yang meningkat, maka penggunaan sumber yang lain adalah diperlukan untuk memenuhi permintaan perindustrian ini. Di antara sumber bahan alternatif yang banyak yang boleh digunakan iaitu daripada sisa kertas dan papan kertas yang terbuang. Kira-kira 40% daripada sisa terbuang ini dikumpul dan dikitar semula, dan yang lebih dibiarkan atau tanam di tapak sisa (Anonymous, 2000b). Jika sebahagian daripada sisa gentian ini dikitar semula dalam penghasilan papan berstruktur, maka sebilangan besar sumber alam akan diselamatkan. Pada masa yang sama, masalah pengurusan sisa dapat dikurangkan juga. Salah satu sisa buangan ini ialah kotak kertas beralun (OCC) berpotensi dalam menghasilkan papan yang bermutu tinggi (Hunt & Vicks, 1999). Seseengah gentian terulang yang digunakan dalam pembuatan papan tidak memerlukan pembersihan dan penyingkiran yang kerap terhadap perekat, dakwat, pencelup dan sebagainya apabila warna papan tidak diutamakan (Krzysik *et al.*, 1997).

Papan gentian boleh dihasilkan daripada proses kering dan proses basah. Pada masa kini, proses kering digunakan dengan meluas sekali berbanding proses basah. Kedua-dua jenis proses ini mempunyai kebaikan dan kelemahan. Maka tiada sebab yang muktamad dalam pengalihan proses basah ke proses kering atau sebaliknya. Proses basah menghadapi peraturan pengawalan pengaliran keluar kumbahan yang semakin ketat. Manakala, proses kering menghadapi peraturan pengawalan pencemaran udara, dan ini menyebabkan penaburan modal yang tinggi dalam peralatan dan kos yang tinggi. Sementara itu, proses basah boleh dijalankan secara

kecilan dengan modal yang lebih kurang seperti proses pembentukan basah jenis “*batch*”. Selain itu, air yang digunakan boleh dikitar semula dalam sistem, maka masalah pengaliran keluar sisa dapat dikurangkan. Dengan itu, perkembangan dan saingan proses basah masih dikekalkan (Suchsland & Woodson, 1991). Dalam kajian ini, proses basah dipilih kerana pemendakan aluminium trihidroksida pada gentian adalah lebih berkesan berbanding dengan proses kering. Dalam proses basah terdapat kumpulan hidroksil daripada aluminium trihidroksida dan gentian, ikatan hidrogen akan terhasil selepas proses penekanan panas. Dengan itu, papan gentian yang mempunyai ikatan yang lebih kuat dapat dihasilkan

1.2 Objektif

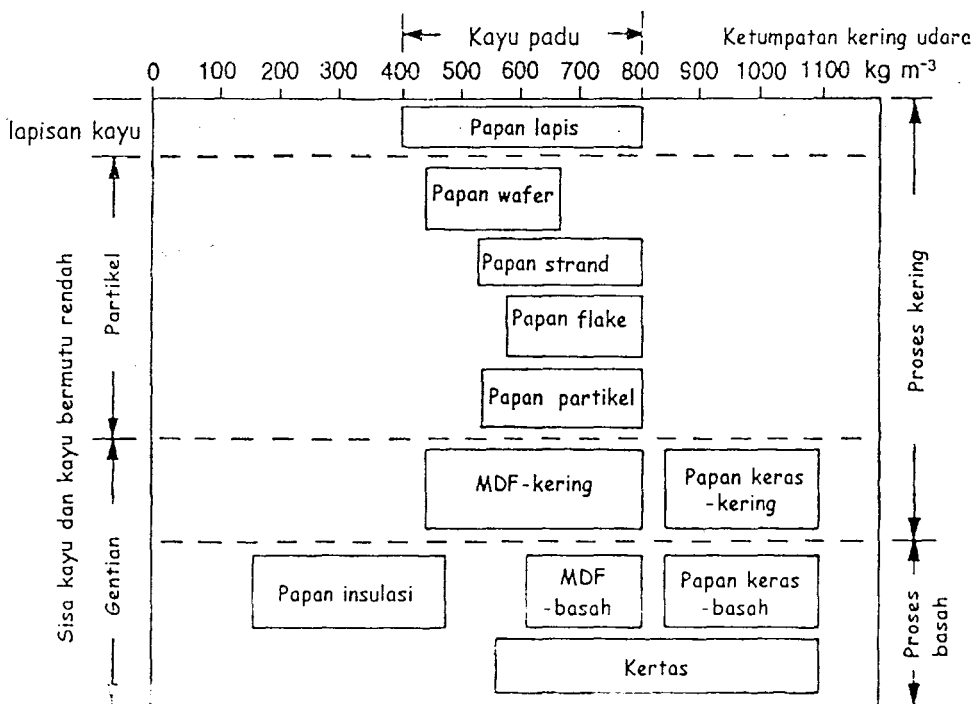
Untuk menghasilkan papan gentian pelambat kebakaran menggunakan pemendakan aluminium trihidroksida melalui proses basah. Papan gentian pelambat kebakaran ini akan melambatkan kebakaran berlaku apabila ia terdedah kepada punca api. Dengan itu, pembakaran papan gentian ini akan menjadi lebih susah atau ia akan merencatkan punca api yang kecil dengan pelepasan wap air daripada penguraian aluminium trihidroksida. Kajian ini menggunakan gentian kertas kotak beralun dan gentian kayu getah dicampurkan pada pelbagai nisbah dalam penghasilan papan gentian pelambat kebakaran. Dengan itu, kesesuaian pencampuran kedua-dua jenis gentian dengan pemendakan aluminium trihidroksida dikaji dengan menentukan sifat fizikal dan mekanikal papan gentian pelambat kebakaran yang dihasilkan. Selain itu, kebolehbakaran dan sifat terma papan gentian ini juga dianalisis.

2. TINJAUAN BACAAN

2.1. Papan Gentian

2.1.1. Pengenalan

Pembuatan papan gentian bermula kira-kira pada permulaan abad 20, dan ia telah diperkembangkan dengan pesatnya di England pada tahun 1898, Amerika Syarikat pada tahun 1908, Perancis pada tahun 1928, Sweden pada tahun 1929 dan negara lain. Pada permulaannya, penghasilan papan gentian ini adalah serupa dengan pembuatan kertas; pemulpaan mekanikal dan pemulpaan kimia serta pembentukan daripada ampaiian gentian dalam perantaraan air. Kemudian, dengan terciptanya pemulpaan secara “letupan” daripada proses *Masonite* pada tahun 1924, dan pembentukan kering diperkenalkan juga (Tsoumis, 1991). Perindustrian penghasilan papan gentian adalah sektor pembuatan berasaskan kayu yang penting.



Rajah 2.1: Pengelasan papan yang berasaskan kayu (Suchsland & Woodson, 1991)

Papan gentian adalah dari katogeri yang merangkumi pelbagai kelas papan komposit yang diperbuat daripada pelbagai jenis proses dan daripada kayu dari kepingan kepada gentian seperti ditunjukkan di Rajah 2.1 (Suchsland & Woodson, 1991). Kayu atau bahan lignoselulosa digunakan dalam bentuk gentian iaitu sebagai gentian kepada bentuk partikel. Kelebihannya ialah perekat tidak selalunya diperlukan (contohnya, proses basah). Gentian-gentian ini dapat diikat bersama dengan kehadiran ikatan hidrogen, pengaliran lignin semasa penekanan panas, anyaman gentian, atau penambahan perekat sintetik. Kepentingan faktor-faktor ini bergantung kepada jenis papan gentian dan cara penghasilannya (Suchsland & Woodson, 1991).

Papan gentian boleh dihasilkan dengan menggunakan bahan kayu yang bermutu rendah serta tidak terhad dalam penggunaannya seperti kulit kayu juga boleh diproseskan bersama. Dengan mengumpulkan gentian yang halus bentuknya, pemprosesan ini mampu menghasilkan papan yang homogen dan merawakkan anisotropi kayu yang digunakan berbanding pemprosesan yang lain seperti pemprosesan papan lapis kecuali pembuatan kertas (Kelly, 1989).

2.1.2. Jenis Papan Gentian

Terdapat dua jenis papan gentian iaitu jenis insulasi (tanpa tekanan) dan jenis dengan tekanan seperti ditunjukkan dalam Jadual 2.1. Perbezaannya berasaskan ketumpatan papan dan cara papan dihasilkan. Dari segi cara penghasilan, papan gentian boleh dibahagikan kepada proses basah dan proses kering (Tsoumis, 1991). Papan insulasi adalah terdiri daripada separuh keras dan keras. Papan insulasi separuh keras adalah berketumpatan rendah ($20 - 150 \text{ kg/m}^3$) dan ia digunakan sebagai insulasi dan pengusyen. Papan insulasi keras ($150 - 400 \text{ kg/m}^3$) digunakan

dalam bidang berstruktur seperti papan pelindungan, bumbung penebatan (Suchsland & Woodson, 1991).

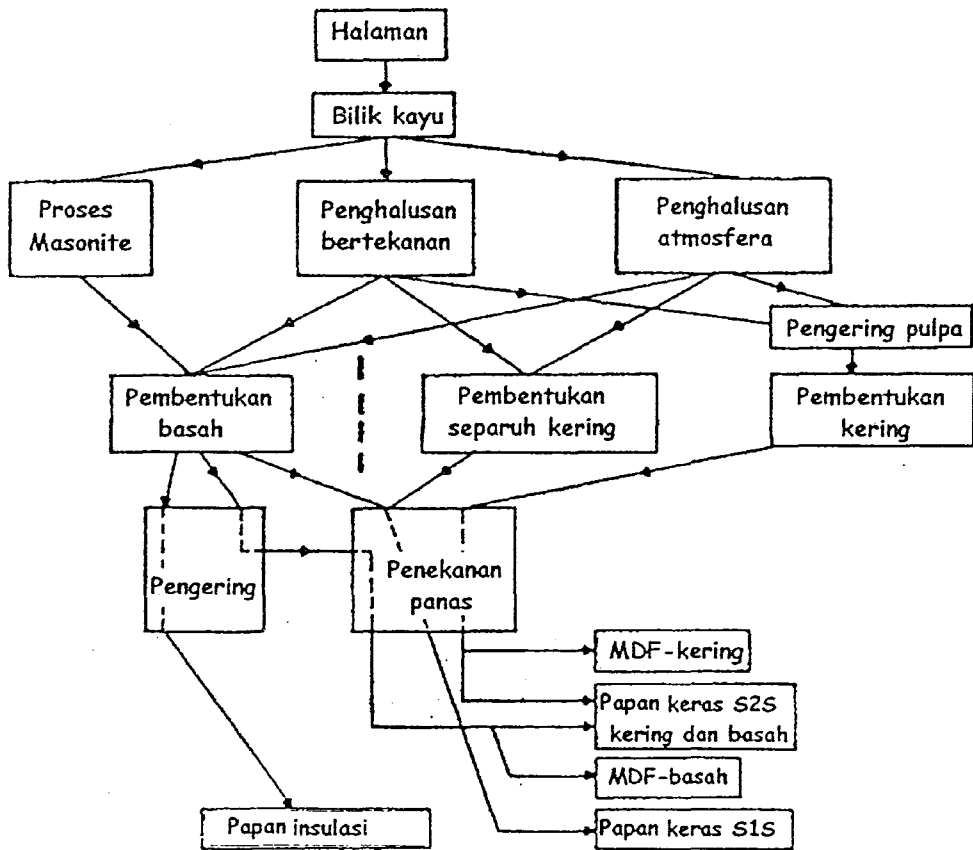
Jadual 2.1: Pengelasan jenis papan gentian (Tsoumis, 1991)

Jenis	Ketumpatan (kg/m^3)
Insulasi (tanpa tekanan)	
1. <i>Separuh keras</i>	20 – 150
2. <i>Keras</i>	150 – 400
Dengan tekanan	
1. <i>Ketumpatan sederhana</i>	400 – 800
2. <i>Papan keras</i>	800 – 1200
3. <i>Ketumpatan tinggi</i>	1200 – 1450

Papan keras ($800 - 1200 \text{ kg/m}^3$) adalah dari jenis papan yang dihasilkan menggunakan tekanan. Papan keras digunakan sebagai dinding rumah, pelapisan lantai, bentuk konkrit, perabot dan sebagainya (VanOss, 1973). Papan gentian berketumpatan $400 - 800 \text{ kg/m}^3$ dikenali sebagai papan gentian berketumpatan sederhana (MDF). Papan ini mempunyai tepi yang padat dan tekstur yang serata, boleh dikerjakan seperti kayu padu, sesuai dikemasiapkan dan banyak digunakan dalam pembuatan perabot. Sementara itu, papan gentian berketumpatan tinggi ($1200 - 1450 \text{ kg/m}^3$) adalah produk yang mahal yang memerlukan kandungan perekat yang tinggi serta melibatkan proses pembuatan yang berkapasiti tinggi (Tsoumis, 1991).

2.1.3. Pemprosesan Papan Gentian

Pemprosesan papan gentian secara keseluruhan ditunjukkan pada Rajah 2.2. Kayu yang boleh digunakan ialah kayu lembut dan kayu keras. Selain itu, kayu dan sisa kayu yang bermutu rendah daripada kilang kayu, kepingan dan papan lapis daripada kilang, sisa pembalakan, serpihan kayu, dan sisa kertas dan papan kertas boleh digunakan juga. Kayu atau bahan lignoselulosa ini diserpihkan dengan peralatan penyerpihan jenis gendang. Kemudian, serpihan kayu ini akan dipulpaikan (Suchsland & Woodson, 1991).



Rajah 2.2: Cara penghasilan papan gentian (Suchsland & Woodson, 1991)

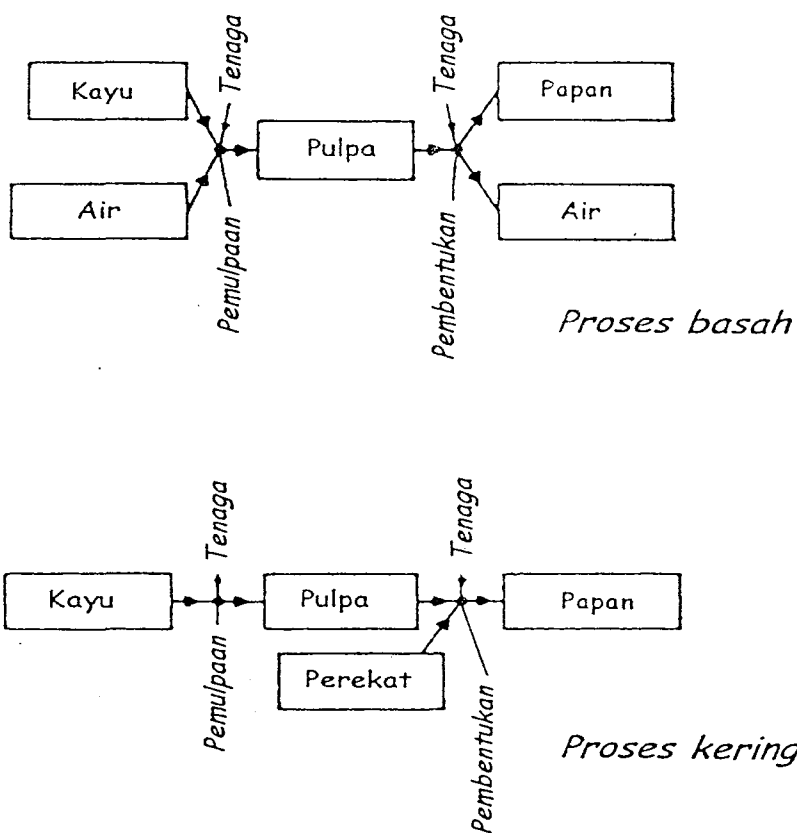
Pemulpaan kayu kepada gentian boleh dilakukan menggunakan tiga jenis pemulpaan mekanikal. Dalam proses *Masonite*, serpihan kayu dikenakan pada tekanan tinggi (7 Mpa), kemudiannya melepaskan tekanan yang tinggi pada serpihan kayu secara tiba-tiba untuk menghasilkan pulpa. Manakala penghalusan bertekanan memisahkan gentian di antara dua kepingan pengisar di bawah suhu dan tekanan yang meningkat. Sementara itu, penghalusan atmosfera iaitu pengisaran pada serpihan yang panas atau sejuk dengan tekanan atmosfera (Walker, 1993).

Pemulpaan secara kimia tidak digunakan dalam perindustrian papan gentian. Gentian dicairkan dengan air dan hamparan gentian dibentuk dengan menggunakan mesin *fourdrinier* (proses basah), atau hamparan gentian dikeringkan dan dibentuk dengan bantuan mesin jalinan udara (proses kering). Perekat dan pensaizan (bahan

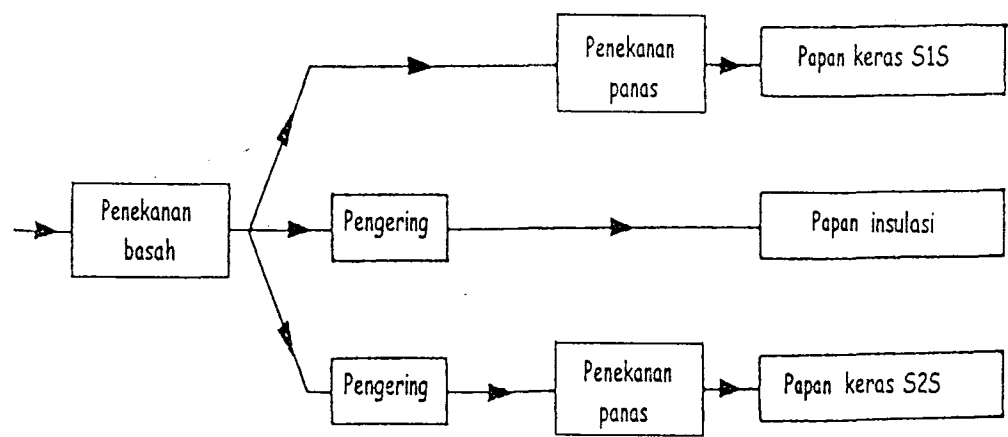
kimia yang mengurangkan penyerapan air) ditambahkan ke dalam sluri gentian dan mendak pada gentian dengan pengurangan pH (proses basah), atau disembur pada gentian atau pencampuran secara mekanikal (proses kering) (Kelly, 1989).

Papan gentian dihasilkan dengan dua jenis proses yang utama iaitu proses basah dan proses kering dan ditunjukkan pada Rajah 2.3. Papan insulasi diperbuat dengan mengeringkan hampan gentian yang basah tanpa penekanan panas (Rajah 2.4). Perekatan bagi papan ini bergantung kepada ikatan hidrogen secara keseluruhan. Manakala, papan gentian yang lain melalui penekanan panas. Penekanan panas akan memampatkan hampan gentian, membekalkan keadaan penghasilan ikatan antara gentian (melembutkan lignin dan pematangan perekat) dan mengurangkan kandungan air hampan gentian. Penyingkiran kandungan air dan stim daripada hampan gentian yang basah dan lembap (setengah kering) semasa penekanan panas, dilakukan dengan meletakkan skrin di antara permukaan bawah hampan gentian dengan permukaan plat penekan panas (Tsoumis, 1991).

Corak skrin akan terjadi pada bahagian belakang papan gentian (S1S) yang terhasil, yang hanya terdapat satu permukaan yang licin. Hampan gentian yang dihasilkan dengan proses kering ditekan tanpa skrin untuk menghasilkan papan gentian (S2S) yang kedua-dua permukaan licin. Papan gentian (S2S) boleh juga dihasilkan daripada hampan gentian kering yang dibentuk secara proses basah (Rajah 2.4). Rekaan kitaran penekanan (hubungan antara tekanan, suhu, dan masa) mempengaruhi taburan ketumpatan melintangi papan gentian, dan juga sifat-sifat kekuatan papan. Papan gentian yang tebal (papan gentian berketumpatan sederhana) adalah sensitif dengan kesan ini (Suchsland & Woodson, 1991).



Rajah 2.3: Gambarajah ringkas pemprosesan papan gentian secara kering dan basah (Suchsland & Woodson, 1991)



Rajah 2.4: Pemprosesan jenis papan gentian secara basah (Suchsland & Woodson, 1991)

2.1.4. Ikatan dalam Papan Gentian

Tiga jenis ikatan gentian yang berlaku secara serentak atau individu adalah bergantung kepada pemprosesan. Jenis ikatan ini ialah ikatan hidrogen, ikatan lignin dan ikatan perekat. Dalam papan gentian yang berketumpatan rendah dan bekertumpatan sederhana, kebanyakan kegagalan tegasan berlaku pada ikatan antara gentian. Manakala papan gentian berketumpatan tinggi, kegagalan berlaku pada gentian. Ini adalah disebabkan sentuhan yang rapat di antara gentian serta pengubahsuaian sifat gentian yang berlaku semasa penekanan panas pada suhu yang tinggi (Kelly, 1989).

Walaupun gentian kayu mempunyai kekuatan tegangan yang sangat tinggi tetapi kekuatan ini tidak dimanfaatkan sepenuhnya dalam kepingan kertas atau papan gentian. Kejadian sebegini disebabkan oleh jumlah ikatan di antara gentian tidak dapat mencerminkan kekuatan tegasan sebagaimana yang ada pada gentian sendiri. Ini juga disebabkan oleh kekuatan ikatan yang rendah. Kewujudan ikatan gentian yang kuat merupakan suatu kejayaan dalam rekaan pemprosesan (Suchsland & Woodson, 1991).

2.1.4.1. Ikatan Hidrogen

Ikatan hidrogen bergantung kepada kekuatan pada jarak yang sangat kecil di antara gentian yang permukaan molekul bergabung serta menghasilkan cas positif bagi atom hidrogen dengan atom yang bercas negatif seperti oksigen. Ikatan hidrogen ini terutamanya berlaku pada pemprosesan papan gentian secara basah. Pemprosesan basah ini menggalakkan ketegangan permukaan semasa penyejatan yang merapatkan gentian-gentian bergabung sekali dalam jarak yang boleh menghasilkan kekuatan molekul (Kelly, 1989).

2.1.4.2. Ikatan Lignin

Ikatan lignin ini disumbang oleh pelembutan lignin semasa pemanasan berlaku. Lignin merupakan bahagian kayu yang terdapat pada luaran sel dinding. Lignin yang banyak mampu bergabung semula semasa pemanasan yang berlaku dalam penekanan panas yang bersuhu tinggi. Ia juga boleh dijelaskan bahawa kondensasi kumpulan fenolik yang terhasil dari lignin. Ikatan lignin ini adalah terhad kepada pemprosesan papan gentian secara basah yang menjalani penekanan panas. Walaupun ia mungkin berlaku pada pemprosesan papan gentian berketumpatan tinggi secara kering di bawah pemulpaan yang keras. Seperti ikatan hidrogen, ikatan lignin juga tidak berlaku pada pemprosesan papan komposit yang lain (Suchsland & Woodson, 1991).

2.1.4.3. Ikatan Perekat

Ikatan perekat dibentuk dengan menggunakan perekat dan ia berlaku pada pemprosesan papan gentian secara kering atau pemprosesan papan komposit yang lain. Perekat ini juga digunakan untuk meningkatkan mutu ikatan dalam pemprosesan papan gentian secara basah. Perekat yang paling biasa digunakan ialah perekat fenol formaldehid (pemprosesan papan gentian berketumpatan tinggi secara kering) dan urea formaldehid (pemprosesan papan gentian berketumpatan sederhana secara kering). Perekat lain ialah minyak pengering dan perekat termoplastik (Suchsland & Woodson, 1991).

2.1.5. Perbandingan antara Proses Kering dengan Proses Basah

Sebarang perbandingan di antara proses kering dengan proses basah mesti dibuat kepada papan yang nipis. Diikuti kebaikan dan kelemahan proses basah dan proses kering.

2.1.5.1. Proses Basah

Kebaikan proses basah adalah seperti berikut:

- Kurang perekat atau tidak memerlukan perekat
- Mengurangkan kemungkinan berlakunya kebakaran
- Pelbagai ikatan berlaku, ikatan hidrogen, lignin dan perekat
- Tanpa pencemaran udara
- Mutu permukaan yang lebih baik
- Permodalan yang rendah dan kurang pengantungan kepada bahan api

Kelemahan yang terdapat bagi proses basah ialah:

- Had ketebalan dengan setengah inci sebagai had maksima
- Penggunaan air yang banyak
- Pengurusan air buangan
- Papan yang berlapisan tunggal
- Corak skrin pada papan (S1S)

(Suchsland & Woodson, 1991)

2.1.5.2. Proses Kering

Kebaikan proses kering adalah seperti berikut:

- Permukaan yang licin (S2S)
- Hasil yang tinggi
- Kebolehan untuk menghasilkan papan yang pelbagai lapisan
- Mengurangkan masalah kepelbagaian jenis gentian yang digunakan
- Pengawalan ketumpatan dan ketebalan papan dengan peralatan automatik
- Tiada kecenderungan arah gentian
- Kekuatan ikatan yang tinggi

Kelemahan yang terdapat bagi proses kering pula ialah:

- Kehilangan ikatan hidrogen
- Kehilangan atau pengurangan ikatan lignin
- Pengantungan kepada perekat secara langsung
- Kesusahan dalam pengendalian dan penyimpanan gentian
- Kemungkinan berlaku kebakaran yang tinggi
- Masalah pencemaran udara
- Mutu permukaan yang kurang baik
- Pengembangan mendatar yang lebih

(Suchsland & Woodson, 1991)

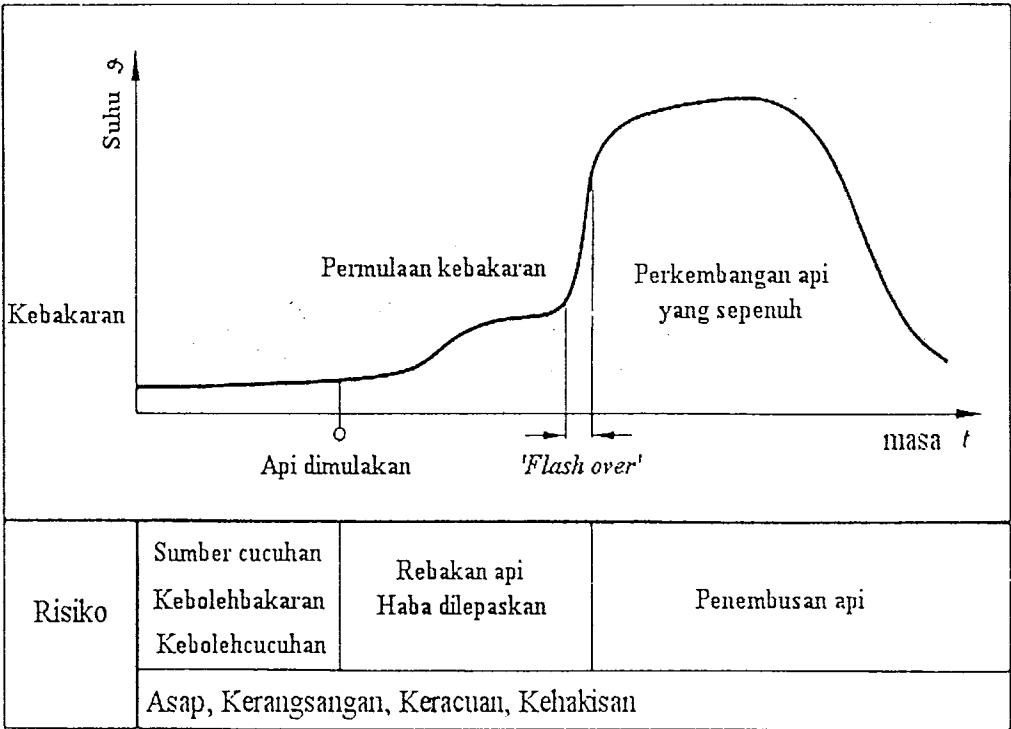
Tiada sebab yang cukup tentang kelemahan dan kebaikan yang mampu menukar proses basah kepada proses kering atau di sebaliknya. Ini disebabkan sama ada

kelemahan atau kerugian tersendiri bagi kedua-dua proses. Penyelesaian yang boleh buat ialah dengan mengubahsuaipembolehubah bagi pemprosesan dan meningkatkan peralatan bila diperlukan (Suchsland & Woodson, 1991).

2.2. Pelambat Kebakaran

2.2.1. Kebakaran

Kebakaran yang berlaku boleh dibahagikan kepada beberapa fasa seperti berikut, sebagai contoh kebakaran dalam bangunan (Troitzsch, 1983).



Rajah 2.5: Fasa yang berlaku dalam kebakaran (Troitzsch, 1983)

Permulaan kebakaran

Sumber cucuhan seperti rokok boleh menyalakan bahan yang mudah terbakar contohnya kertas buangan dalam tong. Bahan ini terbakar dan menjanakan haba, haba ini akan meningkat dan menggalakkan kebakaran bahan lain berlaku seperti menyalakan perabot atau langsir yang berdekatan. Dengan penambahan haba ini, suhu di sekelilingi akan meningkat secara mendadak dan membantu rebakan api. Pada tahap ini, suhu dan haba yang tinggi ini dapat menguraikan atau menghasilkan bahan meruap yang mudah terbakar daripada bahan yang terkandung dalam bangunan. Pembakaran dengan bahan meruap mudah bakar ini menghasilkan api

yang lebih besar dan kemungkinan berlakunya letupan. Akhirnya api telah merebak ke seluruh kawasan bangunan. Pada saat ini, kebakaran api yang disebutkan “*flash over*” (Rajah 2.5) dan perkembangan api yang sepenuh berlaku dan fasa kedua pun bermula (Troitzsch, 1983).

Perkembangan api yang sepenuh

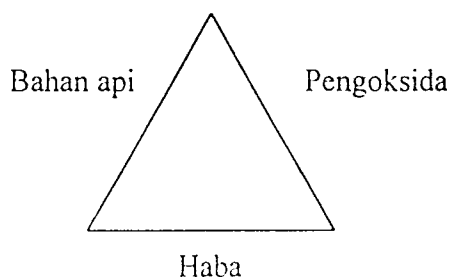
Pada peringkat ini, api akan menembusi pintu, dinding, siling dan tingkap. Akhirnya seluruh bangunan telah ditelan api, dan rebakan api ke sebelah bangunan juga akan berlaku. Suhu bilik melebihi 1000°C dan api membakar sepenuhnya dalam bangunan. Pada masa ini, api telah mencapai tahap maksima (Troitzsch, 1983).

Penyusutan kebakaran

Bergantung kepada api yang terhasil dan keadaan pengudaraan, api akan melepasi tahap maksima dan memasuki fasa penyusutan kebakaran bangunan kerana kehabisan bahan terbakar. Ketiga-tiga fasa dan jenis-jenis risiko ditunjukkan dalam Rajah 2.5 (Troitzsch, 1983).

2.2.2. Kimia Api

Api adalah hasil daripada pembakaran yang berlaku, dan pembakaran ini merupakan hasil daripada pengoksidaan yang cepat. Pengoksidaan ini melibatkan tenaga yang nyata atau dalam bentuk tidak terlihat. Bentuk yang tidak terlihat adalah haba, dan yang nyata ialah cahaya (Turner & McCreery, 1981).



Rajah 2.6: Gambarajah segitiga api (Turner & McCreery, 1981)

Gambarajah segitiga api sering salah dilabelkan, sebelah, bahan api; sebelah, haba; sebelah, oksigen. Sebelah yang terakhir iaitu oksigen sepatutnya dilabel sebagai pengoksida, kerana kehilangan elektron yang cukup kerap akan menghasilkan api (Rajah 2.6) (Turner & McCreery, 1981).

Pirolisis ialah tindak balas tanpa pengoksidaan bagi bahan yang menghasilkan bahan meruap yang akan bercampur dengan oksigen (Shields & Silcock, 1987). Dalam penjelasan yang ringkas, pembakaran adalah seperti berikut:

Bahan api + pengoksida \longrightarrow pembakaran dan hasilnya

Contohnya: $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Kebanyakan proses pembakaran berlaku dalam udara yang mengandungi campuran kira-kira 21% oksigen dan 79% nitrogen. Sebagai contoh:

$\text{CH}_4 + 2 (\text{O}_2 + 79/21 \text{ N}_2) \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2 (79/21) \text{ N}_2$

Bahan api + (pengoksida + pencair) \longrightarrow hasil pembakaran + pencair

Pencair tidak terlibat dalam proses pembakaran, tetapi ia melibatkan proses fizikal yang menghilangkan tenaga haba daripada proses pembakaran. Apabila kekurangan bahan api atau oksigen, pembakaran yang tidak sempurna akan berlaku. Di bawah adalah proses pengoksidaan yang tidak sempurna, kekurangan pengoksida menyebabkan berlebihan bahan api (Shields & Silcock, 1987).

$\text{CH}_4 + 3/2 (\text{O}_2 + 79/21 \text{ N}_2) \longrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} + (3/2 \times 79/21) \text{ N}_2$

Selepas itu, tindak balas berikut cenderung berlaku:

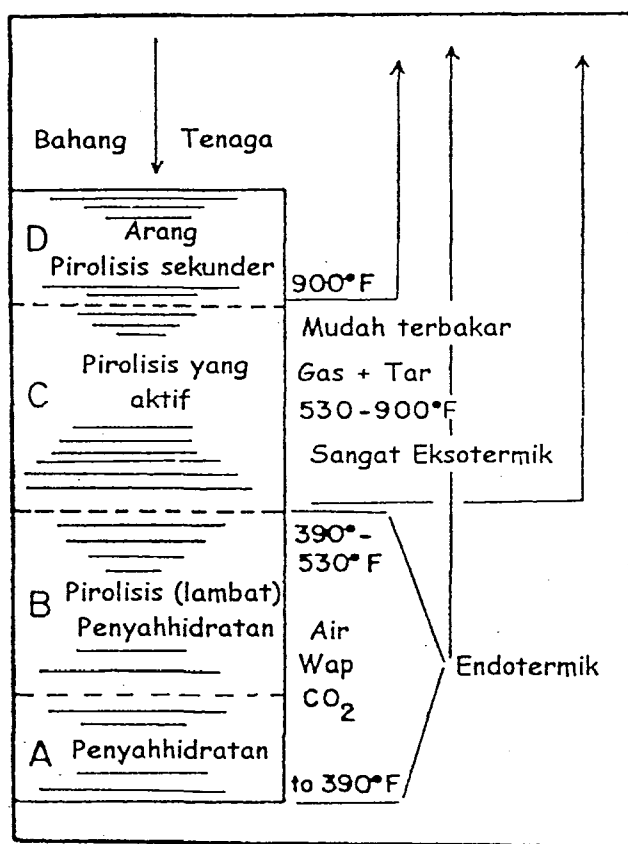
$\text{CH}_4 + (2 + a) (\text{O}_2 + 79/21 \text{ N}_2) \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + (2 + a) 79/21 \text{ N}_2 + a\text{O}_2$

Bahan api + udara \longrightarrow hasil pembakaran + pencair

Oksigen yang tidak bertindak balas menjadi pencair dan membantu penyerapan tenaga pembakaran (Shields & Silcock, 1987).

2.2.3. Pirolisis kayu

Apabila kayu dipanaskan tanpa kehadiran udara, zon-zon akan terhasil secara bersetentang dengan sumber haba yang dibekalkan (Rajah 2.8). Kedalaman zon dipengaruhi oleh suhu yang dicapai. Zon pirolisis ini jelas ditunjukkan pada kayu yang mempunyai kekonduksian terma dan ketumpatan yang rendah dan secara relatif mempunyai haba yang tinggi (Browne, 1969).



Rajah 2.7: Pirolisis kayu dalam keadaan tanpa udara (oksigen) (Browne, 1969)

Zon A, mencapai suhu 200°C (392°F)

Di zon A (Rajah 2.7), lapisan permukaan kayu menyejat dan kering serta membebaskan wap air. Di samping itu, terdapat juga karbon dioksida, asid formik dan asid asetik dan "glyoxal" (Rowell, 1984).

Zon B, suhu antara 200°C dengan 280°C (392°F ke 536°F)

Zon A memasuki ke dalam kayu dan diganti oleh zon B yang terbentuk dan pirolisis yang lambat berlaku (Rajah 2.7). Wap air, karbon dikosida, asid formik dan asid asetik, "*glyoxal*", dan mungkin terdapat sedikit karbon monoksida dibebaskan. Sementara itu, wap dari zon A akan melepasi zon B. Tindak balas ini adalah endotermik dan gas yang terhasil adalah tidak terbakar. Selain itu, kayu mulai hangus (Draganov, 1968).

Zon C, suhu antara 280°C dengan 500°C (536°F ke 932°F)

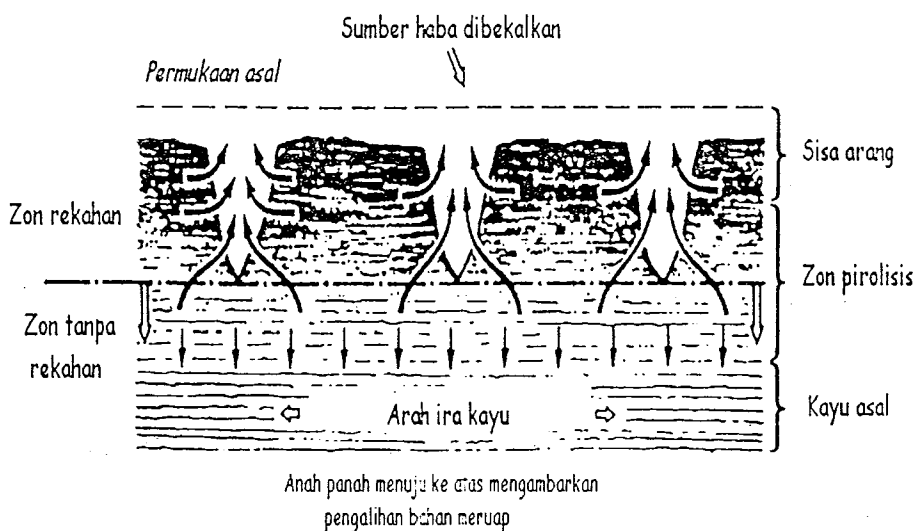
Zon A dan Zon B bergerak masuk ke dalam kayu, dan diganti oleh zon C yang berlakunya pirolisis yang aktif serta tindak balas yang eksotermik (Rajah 2.7). Suhu meningkat dengan mendadak kecuali haba tidak dibekalkan. Gas-gas terbakar seperti karbon monoksida, metana, formaldehid, asid formik, asid asetik dan metanol dibebaskan. Akhirnya hidrogen, karbon dioksida dan wap air menutupi gas terbakar ini serta menghasilkan titisan yang mudah terbakar dan yang tertinggal hanya arang (Rowell, 1984).

Kayu dalam pirolisis yang awal akan meneruskan pirolisis dan tindak balas juga terhasil sebelum mengakhiri pirolisis. Pirolisis pada tahap kedua mungkin berlaku jika dimangkin oleh arang yang sangat aktif pada suhu antara 280°C dengan 500°C . Pirolisis tahap kedua ini akan menghasilkan tar yang sangat eksotermik. Dalam perindustrian penyulingan kayu, suhu dikawal agar pirolisis berlaku sampai tahap zon C, dan sehingga zon A dan zon B mencapai pertengahan kayu serta semua tar dikeluarkan. Pada peringkat ini, tindak balas bertukar menjadi endotermik (Browne, 1969).

Asap berhenti sebelum suhu mencapai 400°C di pertengahan kayu. Pengkarbonan dianggap lengkap pada suhu 400°C ke 600°C . Kayu yang berserabut tertinggal walaupun perubahan teruk pada komposisi kayu pada suhu 300°C . Penghabluran grafit berlaku pada suhu melebihi 400°C (Draganov, 1968).

Zon D, suhu melebihi 500°C (932°F)

Jika suhu permukaan diteruskan atau ditingkatkan sebelum pengkarbonan lengkap, zon D (Rajah 2.7) yang terdiri daripada arang akan menjana tindak balas tambahan. Tindak balas ini melibatkan gas dan tar daripada zon-zon yang bawah zon D. Contohnya, karbon dioksida dan wap air yang bertindak balas dengan karbon dan membentuk karbon monoksida, hidrogen dan formaldehid (Browne, 1969).

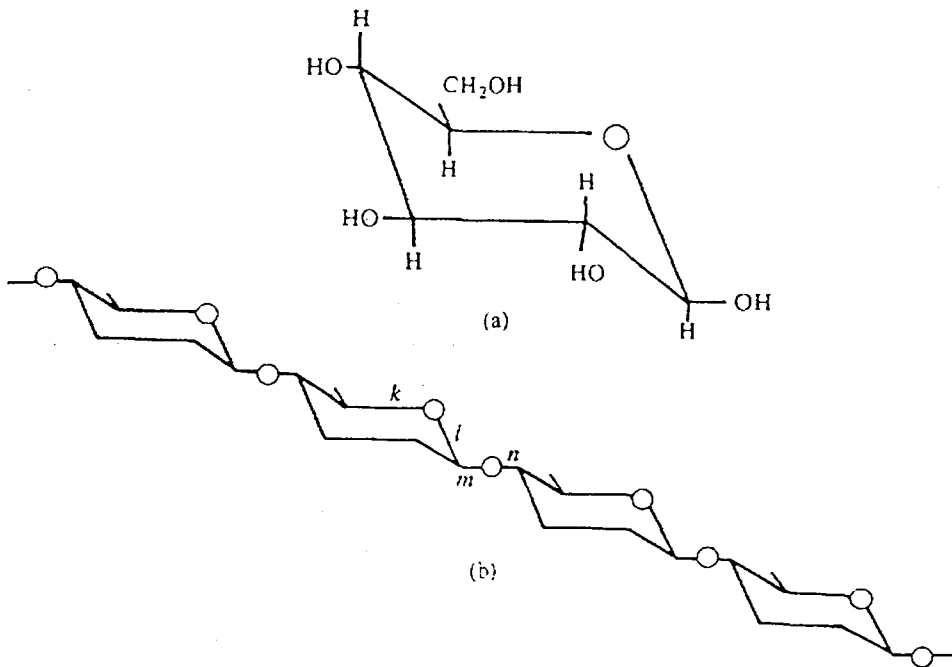


Rajah 2.8: Keratan rentas kayu yang terbakar atau menjalani pirolisis (Drysdale, 1999)

2.2.4. Pembakaran Kayu

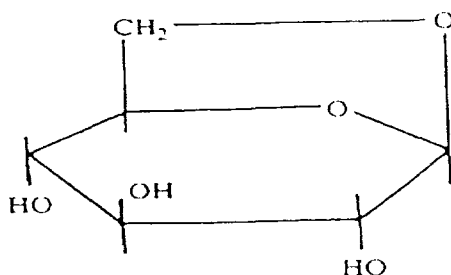
Tindak balas kimia dan mekanisme yang terlibat dalam pembakaran selulosa yang tanpa rawatan adalah sangat rumit dan masih tidak difahami sepenuhnya. Dengan penambahan bahan kimia pelambat api, keadaan bertambah lebih rumit lagi.

Kayu (selulosa) tidak membakar secara langsung. Dengan adanya pemanasan, tindak balas permulaan yang berlaku ialah pirolisis, gas dan wap yang dihasilkan akan bercampur dengan udara dan menjadi terbakar (Rajah 2.8) (Shaw, 1991).



Rajah 2.9: (a) β -D-Glukopiranos (D-glukosa dalam keadaan stabil); (b) sebahagian molekul selulosa (Drysdale, 1999)

Terdapat dua mekanisme yang bersaing dalam degradasi selulosa. Jika salah satu ikatan yang bertanda *k* atau *l* (Rajah 2.9) terbelah, gelang yang besisi enam akan terbuka tetapi rantaian polimer yang berterusan masih terikat. Dalam keadaan ini, kayu akan menjadi hangus dengan kehadiran bahan meruap yang utama seperti CO, CO₂ dan H₂O. Sekiranya, ikatan *m* atau *n* (Rajah 2.9) terbelah, “tulang belakang” iaitu rantaian polimer terputah, ini meninggalkan hujung yang terbuka dan aktif dan molekul levoglukosan akan terbebas daripada zon yang bersuhu tinggi. Penghasilan tar yang mengandungi bahan meruap yang terbakar serta bahan yang kurang meruap ialah levoglukosan (Drysdale, 1999).



Rajah 2.10: Struktur levoglukosan (Drysdale, 1999)

Semasa penyalaan berlaku, pembakaran levoglukosan adalah pembakaran bernyala. Sisa pepejal termasuk arang yang boleh mengalami pelbagai pembakaran yang melibatkan oksigen adalah bukti kepada pembakaran berbara. Perbezaan jenis pembakaran ini adalah penting kerana banyak bahan kimia yang menghalang nyalaan api dengan berkesan, tetapi hanya terdapat sedikit kesan kepada penghalangan pembakaran berbara. Dalam kegunaan, pelambat kebakaran berbara adalah penting, tetapi dalam keadaan yang tertentu, penghalangan pembakaran berbara juga perlu diambil berat (Shaw, 1991).

2.2.5. Degradasi Terma bagi Komponen Kayu

Degradasi terma kayu boleh diwakili dengan mengabungkan semua degradasi terma komponen kayu seperti selulosa, hemiselulosa dan lignin. Akan tetapi, degradasi terma kayu boleh berbeza dengan gabungan degradasi terma komponen kayu (Schniewind, 1989). Dengan itu, perbincangan seterusnya adalah mengenai setiap degradasi terma komponen kayu.

2.2.5.1. Degradasi Terma Selulosa

Selulosa adalah bertanggung jawab dalam menghasilkan bahan meruap terbakar. Degradasi berlaku dengan pendehidran, hidrolisis, pengoksidaan, pendekarboksilan dan pentransglukosilan. Pada haluan suhu rendah, air dibebaskan daripada selulosa

yang kering ketuhar, selulosa akan mengalami penurunan darjah pempolimeran yang banyak (Browne, 1969).

Degradasi terma selulosa boleh ditingkatkan dengan kehadiran air, asid dan oksigen. Dengan suhu yang semakin meningkat, darjah pempolimeran selulosa menurun, radikal bebas muncul sebagai kumpulan karbonil, karboksil dan hidroperoksida dibentuk. Darjah degradasi terma meningkat dengan pemanasan yang berterusan (Levan & Winandy, 1990).

Tindak balas yang utama dalam haluan suhu tinggi ialah pendepolimeran. Keadaan ini berlaku apabila struktur selulosa menyerap tenaga yang cukup bagi menjalani pengguntingan ikatan glikosidik dan menghasilkan glukosa. Dengan penghidratan, glukosa ini akan bertukar menjadi oligosakarida dan levoglukosan (1, 6 – anhidro - β - D – glukopiranos). Ikatan glikosidik boleh dihidrolisis pada suhu bilik dengan adanya kehadiran asid kuat (Rowell, 1984).

Semasa pirolisis, air dan asid akan dihasilkan oleh selulosa dan hemiselulosa. Semasa suhu meningkat kepada 450⁰C, penghasilan bahan meruap adalah sempurna. Kehilangan berat berterusan disebabkan oleh degradasi arang yang tertinggal (Schniewind, 1989).

2.2.5.2. Degradasi Terma Hemiselulosa

Secara terma, hemiselulosa adalah kurang stabil berbanding dengan selulosa dan ia juga menghasilkan gas tidak terbakar dengan banyak dan kurang tar. Kebanyakan hemiselulosa tidak menghasilkan levoglukosan. Pendeasetilan (*deacetylation*) hemiselulosa kurang menghasilkan asid asetik semasa pirolisis (Browne, 1969).

Hemiselulosa bagi kayu keras adalah kaya dengan xilan dan mengandungi glukomannan yang kurang. Manakala hemiselulosa bagi kayu lembut mengandungi xilan yang kurang tetapi kaya dengan galaktoglukomannan. Secara terma, xilan

daripada hemiselulosa adalah paling kurang stabil, kerana pentosan mudah dijalani hidrolisis dan pendehidratan. Hemiselulosa mengalami degradasi pada suhu 200°C ke 260°C (Schniewind, 1989).

2.2.5.3. Degradasi Terma Lignin

Pirolisis lignin akan menghasilkan fenol daripada pengguntingan ikatan eter dan ikatan karbon-karbon. Arang yang lebih banyak dihasilkan berbanding dengan pilorisis selulosa. Struktur lignin telah dikaji dengan spektrometri massa untuk menentukan pelbagai hasil pilorisis bagi lignin. Pendehidratan berlaku pada suhu sekitar 200°C dan terutamanya bertanggungjawab dalam degradasi lignin (Rowell, 1984).

Pada suhu antara 150°C - 300°C , pengguntingan ikatan α - dan β - aril - alkil - eter berlaku. Sekitar suhu 300°C , tepi rantai alifatik mulai berceraai daripada gelang aromatik. Manakala pengguntingan ikatan karbon-karbon daripada lignin berlaku pada suhu antara 370°C - 400°C . Degradasi lignin adalah tindak balas eksotermik yang berlaku pada suhu antara 225°C - 450°C dan bergantung kepada pilorisis yang berlaku sama ada dalam nitrogen atau udara (Schniewind, 1989).

2.2.6. Teori Mekanisme Pelambat Kebakaran

Empat jenis teori terlibat dalam penjelasan mekanisme pelambat kebakaran dengan bahan kimia sama ada pembakaran berbara atau bernyala (Bikales *et al.*, 1967). Tidak ada teori yang tunggal dapat menjelaskan mekanisme ini. Dalam kebanyakan kes, mekanisme ini melibatkan lebih daripada satu teori. Empat jenis teori yang dapat menjelaskan bagaimana bahan kimia boleh memperlambat kebakaran adalah seperti berikut:

2.2.6.1. Teori Terma

Terdapat tiga kemungkinan bahan kimia pelambat kebakaran mengurangi penghasilan terma pada bahan yang telah dirawat. Yang pertama, bahan kimia ini meningkatkan kekonduksian terma lalu menyuraikan haba pembakaran. Yang kedua, meningkatkan penyerapan terma dan mengurangkan jumlah haba yang cukup untuk berlaku pirolisis, dan yang ketiga, bahan kimia ini membekalkan penebatan terma dengan mengurangkan haba menembusi substrat. Penebatan terma adalah mekanisme yang terpenting dan ia juga dibincangkan di bawah (Shaw, 1991).

2.2.6.2. Teori Penyalutan

Terdapat bahan kimia pelambat kebakaran yang lebur pada suhu yang rendah secara relatif, dan dipercayai bahawa ia akan membina suatu penyalutan pada gentian atau bahan terawat. Penyalutan ini akan menghasilkan penebatan dengan menghalang oksigen serta mengelakkan bahan meruap terkeluar. Bahan kimia yang berkesan akan menghasilkan buih-buih yang bertindak sebagai dinding penebatan. Cat intumesen dan penyalutan mampu melindungi substrat dengan mekanisme ini (Shaw, 1991). Dari fungsi ini, teori penyalutan adalah bersilang dengan teori terma. Walaupun mekanisme ini adalah penting dalam penyalutan intumesen, ia adalah tidak berkesan dalam kain kapas (Bikales *et al.*, 1967).

2.2.6.3. Teori Gas

Terdapat bahan kimia yang melepaskan gas yang tidak terbakar seperti air, karbon dioksida dan ammonia di bawah pendedahan haba. Gas ini akan mencairkan gas terbakar dengan secukupnya dan menukarkannya menjadi gas tidak terbakar ke udara. Sesetengah bahan kimia ini akan merencatkan tindak balas rantaian yang terbakar dalam fasa gas (pembakaran bernyala). Halogen yang mengandungi sifat